

不可逆三热源热泵的优化性能

The Optimal Analysis of Irreversible Three-heat-source Heat Pumps

林国星 严子浚

(厦门大学物理系 福建 361005)

【摘要】 提出一种新的不可逆三热源热泵循环模型,基于此模型,应用优化理论探讨传热及工质内部不可逆性对热泵性能的影响,导出热泵的最大泵热率与性能系数间的关系。由此关系确定了热泵的一些重要新性能界限,并讨论了热泵的一些优化性能。所得结论可为三热源热泵新技术的开发和优化设计提供些新理论指导。

【关键词】 三热源热泵 不可逆性 优化设计

1 引言

三热源热泵是吸收式热泵、吸附式热泵和化学热泵等一类三热源设备的统称。近年来,应用三热源热泵的新技术有了较大发展,不仅在工业、商业和民用等方面得到普遍应用,而且还深入到农副业等领域。众所周知,三热源热泵是有效利用低温位热源的一种技术手段,对节约能源和减少环境污染等方面具有重要意义,目前欧美日等国都很重视它的开发和利用。因此,应如何进一步改善三热源热泵的性能是当前急需研究的一个新课题。为此,近几年,不少学者应用有限时间热力学理论研究传热的不可逆性对热泵性能的影响,其结论比经典热力学有关结论对实际热泵更有指导意义。然而,实际三热源热泵是一种复杂的设备,除了传热不可逆性外,还存在诸如工质内部耗散、机械磨损、质量流阻等其它不可逆性。因此,考虑多种不可逆因素对三热源热泵性能的影响是必要的,有助于使理论更趋完善,获得对实际热泵更有应用价值的新结论。

本文提出一种新的不可逆三热源热泵循环模型,应用它导出热泵的最佳泵热率与性能系数间的关系,即基本优化关系,并由此讨论热泵的各种优化性能及有关的新界限。

2 不可逆三热源热泵循环模型

设三热源热泵工作于驱动热源 T_h 、环境温度 T_o 和泵热空间温度 T_p 之间,如图 1 所示,其中 T_1 、 T_2 和 T_3 分别是循环工质在三个等温过程的温度,它们与三个热源的温度不同,使得传热在有限温差下进行,热泵可有一定的泵热率。再设传热满足牛顿定律,即工质与 T_h 、 T_p 和 T_o 三个热源的热流率分别为:

$$q_h = K_h A_h (T_h - T_1) \quad \dots\dots (1)$$

$$q_p = K_p A_p (T_2 - T_p) \quad \dots\dots (2)$$

$$q_o = K_o A_o (T_o - T_3) \quad \dots\dots (3)$$

其中 K_h K_p K_o 和 A_h A_p A_o 为相应的传热系数和传热面积,而总传热面积

$$A = A_h + A_p + A_o \quad \dots\dots (4)$$

为便于分析,将三热源热泵的不可逆性分为外部和内部两种^[6,7]。外部不可逆性来自工质与热源间的传热温差,即由于热阻;内部不可逆性来自工质内部的磨擦、涡流和其它不可逆效应。由于工质内部不可逆性的总效果可由循环内部熵产来表征,故可引入参数

$$I = \Delta S_p / (\Delta S_h + \Delta S_o) \quad \dots\dots (5)$$

来描述循环内部的不可逆性,其中 ΔS_h ΔS_o 和 ΔS_p 分别为 T_h T_3 等温过程中流进工质和 T_2 等温过程中从工质流出的熵流,且有 $\Delta S_p = \Delta S_h + \Delta S_o + \Delta S_i$,而 ΔS_i 为循环内部各种不可逆效应所引起的熵产。显然,由于实际三热源热泵工质内部所进行的循环都是不可逆的,因而有 $\Delta S_i > 0$,即 $\Delta S_i > \Delta S_h + \Delta S_o$,以致 $I > 1$ 而当循环为内可逆时^[1-3], $I = 1$ 可见,本文所建立的不可逆三热源热泵循环模型也包括了内可逆循环模型。

3 不可逆三热源热泵的最佳性能系数

据以上模型以及热力学第一和第二定律,有

$$q_h + q_p + q_o = 0 \quad \dots\dots (6)$$

$$q_p / T_2 - q_h / T_1 - q_o / T_3 \geq 0 \quad \dots\dots (7)$$

再由式 (5),可将式 (7) 写为:

$$q_p / T_2 - I(q_h / T_1 + q_o / T_3) = 0 \quad \dots\dots (8)$$

从式 (6) 和 (8),可求得不可逆三热源热泵的性能系数

$$J = q_p / q_h = (T_1 - T_3) I T_2 / [T_1 (I T_2 - T_3)] \quad \dots\dots (9)$$

联立式 (1) - (4),又可求得这类热泵的泵热率

$$C = q_p = A K_p \left[\frac{1}{T_2 - T_p} + \frac{b_1 J^{-1}}{T_h - T_1} + \frac{b_2 (1 - J^{-1})}{T_o - T_3} \right]^{-1} \quad \dots\dots (10)$$

其中 $b_1 = K_p / K_h$ 及 $b_2 = K_p / K_o$

为便于计算,令 $x = T_3 / T_1$, $y = T_3 / (I T_2)$ 及 $z = T_3$,则可将式 (9) 和 (10) 写为

$$J = (1 - x) / (1 - y) \quad \dots\dots (11)$$

$$C = K_p A \left[\frac{I y}{z - I y T_p} + b_1 \left(\frac{1 - y}{1 - x} \right) \frac{x}{T_h - z} + b_2 \left(\frac{x - y}{1 - x} \right) \frac{1}{z - T_o} \right]^{-1} \quad \dots\dots (12)$$

将式 (11) 和 (12) 代入拉氏函数

$$\mathcal{L} = J + \lambda C \quad \dots\dots (13)$$

则由欧拉-拉格朗日方程 $\partial \mathcal{L} / \partial x = 0$, $\partial \mathcal{L} / \partial y = 0$ 及 $\partial \mathcal{L} / \partial z = 0$,可求得当

$$T_1 = \frac{\overline{Ib_1^{-1} T_h T_o + I \overline{b_2/b_1 (1 - J^{-1}) T_h T_p + I J^{-1} T_p T_o}}}{(1 + \overline{Ib_1^{-1}}) T_o + (\overline{b_2/b_1 - 1})(1 - J^{-1}) I T_p} \quad \dots\dots (14)$$

$$T_2 = \frac{(\overline{Ib_1})^{-1} T_h T_o + \overline{b_2/b_1 (1 - J^{-1}) T_h T_p + J^{-1} T_o T_p}}{(1 + \overline{Ib_1^{-1}}) T_o + (\overline{Ib_1^{-1} + b_2/b_1})(1 - J^{-1}) T_h} \quad \dots\dots (15)$$

$$T_3 = \frac{\overline{Ib_1^{-1} T_h T_o + I \overline{b_2/b_1 (1 - J^{-1}) T_h T_p + I J^{-1} T_p T_o}}}{(\overline{Ib_1^{-1} + b_2/b_1}) T_h + (1 - \overline{b_2/b_1}) I J^{-1} T_p} \quad \dots\dots (16)$$

时 J 为最佳, 再将式 (14) - (16) 代入式 (12), 可得不可逆三热源热泵的最佳性能系数 J 与泵热率 C 间的关系, 即基本优化关系

$$C = KA \frac{T_h (IT_p - T_o) (J_1 - J)}{T_o + B^2 (J - 1) T_h + (B - 1)^2 (J^{-1} - 1) IT_p} \quad \dots\dots (17)$$

其中 $K = K_p / (\overline{I} + \overline{b_1})^2$, $B = (\overline{I} + \overline{b_2}) / (\overline{I} + \overline{b_1})$, 而 $J_1 = (T_h - T_o) IT_p / [T_h (IT_p - T_o)]$ 由式 (17) 可讨论不可逆三热源热泵的各种优化性能。

当 $I = 1$ 时, 式 (17) 可简化为

$$C = AK \frac{T_h (T_p - T_o) (J_r - J)}{T_o + B^2 (J - 1) T_h + (B - 1)^2 (J^{-1} - 1) T_p} \quad \dots\dots (18)$$

式 (18) 正是忽略循环内部不可逆性的内可逆三热源热泵的基本优化关系^[2], 其中 J_r 为可逆三热源热泵的性能系数。而当 K_h , K_o 和 K_p 都趋于 ∞ 时, 式 (18) 又可进一步简化为 $J = J_c$ 。可见, 式 (17) 是三热源热泵的一个很普遍的基本优化关系, 它综合考虑了传热及循环内部不可逆性对三热源热泵性能的影响, 因而由它可获得对实际有指导意义的各种优化关系和性能界限, 提供有用的新依据。

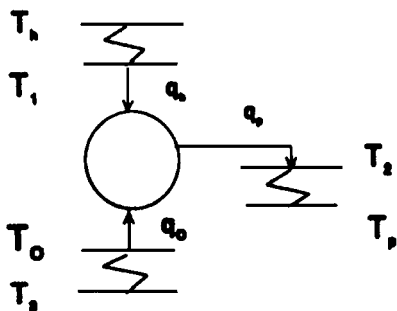


图 1 不可逆三热源热泵示意图

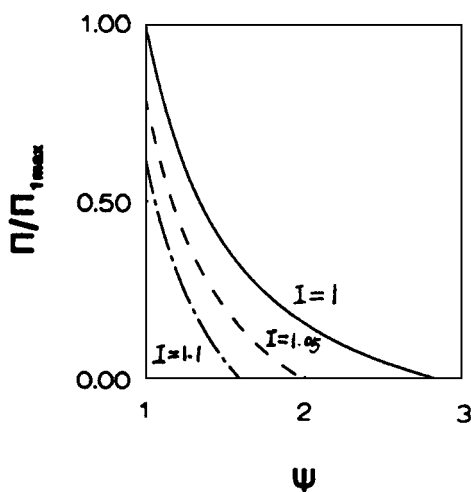


图 2 不同 I 时的 $C - J$ 曲线

4 讨论

1) 由式 (17) 可得不可逆三热源热泵在不同 I 时的 $C - J$ 曲线, 如图 2 所示. 图中设 $T_h = 130^\circ\text{C}$, $T_o = 20^\circ\text{C}$, $T_p = 50^\circ\text{C}$, $b_1 = 1$ 和 $b_2 = 2$. 由图 2 可清楚地看出, 最大泵热率 C_{\max} 和性能系数的高限 J_1 均随内不可逆性 I 的增加而迅速减小. 例如, 当 $I = 1.05$ 时, $C_{\max} \cong 0.8 C_{1\max}$, $J_1 \cong 0.68 J_r$; 而当 $I = 1.1$ 时, $C_{\max} \cong 0.6 C_{1\max}$, $J_1 \cong 0.53 J_r$, 其中 $C_{1\max}$ 为内可逆三热源热泵的最大泵热率. 由此可见, 工质内部不可逆性对三热源热泵性能的影响是比较大的, 在三热源热泵的优化设计中应予足够的重视.

2) 为使不可逆三热源热泵工作在最佳工况, 工质与三个热源间的传热面积必须满足一定的条件. 应用式 (17) 和 (1) - (3), 可得三个优化的传热面积分别为

$$A_h = \frac{K}{K_h} \frac{(1 + \frac{I b_1^{-1}}{T_o + B^2(J-1)T_h + (1-B)^2(J^{-1}-1)IT_p}) T_o + (1 - \frac{b_2/b_1}{(1-B)^2(J^{-1}-1)IT_p}) IT_p}{A} \quad \dots\dots (19)$$

$$A_o = \frac{K}{K_o} \frac{(1 + \frac{I b_2^{-1}}{T_o + B^2(J-1)T_h + (1-B)^2(J^{-1}-1)IT_p}) (J-1) T_h + (1 - \frac{b_1/b_2}{(1-B)^2(J^{-1}-1)IT_p}) IT_p}{A} \quad \dots\dots (20)$$

$$A_p = \frac{K}{K_p} \frac{(1 + \frac{I b_2}{T_o + B^2(J-1)T_h + (1-B)^2(J^{-1}-1)IT_p}) (J-1) T_h + (1 + \frac{I b_1}{(1-B)^2(J^{-1}-1)IT_p}) T_o}{A} \quad \dots\dots (21)$$

当 $K_h = K_o = K_p$ 时, 式 (19) - (21) 可简化为

$$A_h = \frac{T_o}{(1 + \frac{I}{T_o + (J-1)T_h}) [T_o + (J-1)T_h]} A \quad \dots\dots (22)$$

$$A_o = \frac{(J-1) T_h}{(1 + \frac{I}{T_o + (J-1)T_h}) [T_o + (J-1)T_h]} A \quad \dots\dots (23)$$

$$A_p = \frac{I}{1 + \frac{I}{T_o + (J-1)T_h}} A \quad \dots\dots (24)$$

由式 (22) - (24) 可知, 在热源温度、总传热面积和性能系数给定的情况下, A_h 和 A_o 都是 I 的单减函数, 而 A_p 是 I 的单增函数, 且有

$$A_p I (A_h + A_o) = I \quad \dots\dots (25)$$

式 (25) 指明了在所给定条件下, 当工质内部不可逆性 I 大时, A_p 要相对大些, 而 $A_h + A_o$ 要相对小些; 而当 $I = 1$ 时, 应使 $A_p = A_h + A_o$. 这物理意义是很明确的, 因为由 I 的定义式 (5) 可知, I 大时 $\triangle S_p = Q_p/T_2$ 相对地大 (其中 Q_p 为循环的泵热量), 而 q_p/q_o 又要保持不变, 从而 T_2 要小些. 再根据式 (2), A_p 就要相对大些. 这些结论可为实际三热源热泵传热面积的优化选择提供些理论指导.

3) 当 $T_h \rightarrow \infty$ 时, 式 (17) 简化为

$$C = A \frac{K_p K_o}{(I K_o + K_p)^2} \frac{IT_p + (T_o - IT_p) J}{J - 1} \quad \dots\dots (26)$$

式 (26) 是不可逆卡诺热泵的泵热率 C 与性能系数 J 间的优化关系. 这时内不可逆性

$$I = \triangle S_p / \triangle S_o \quad \dots\dots (27)$$

并且由于 $T_h \rightarrow \infty$ 时 $A_h \rightarrow 0$, 故有总传热面积

$$A = A_o + A_p \quad \dots\dots (28)$$

可由不可逆三热源热泵的结果推出不可逆卡诺热泵的相应结果是显然的。因为在牛顿热定律下, 温度趋于 ∞ 的热源相当于一个热源^[8], 这时三热源热泵就相当于卡诺热泵。这就进一步表明了本文的结论具有很普遍的意义, 不仅可用于不可逆、内可逆和可逆三热源热泵, 而且也可用于不可逆、内可逆和可逆卡诺热泵。

总之, 本文在内可逆三热源热泵模型的基础上, 引进能概括描述循环工质内部不可逆性的参数 I 所建立的不可逆三热源热泵模型, 可综合反映实际三热源热泵中传热及各种内部不可逆性, 是一种有用的循环模型, 所得结论可为实际三热源热泵提供些新理论指导。

参考文献

- [1] Yan Z and Chen J. J. Appl. Phys., 1994, 76 8129
- [2] Chen J. Energy, 1994, 19(10): 1031
- [3] 严子浚, 陈苏煌. 科学通报, 1986, 31: 798
- [4] De Vos A. Am. J. Phys., 1985, 53 570
- [5] Angulo - Brown F. J. Appl. Phys., 1993, 74 2216
- [6] Lin G and Yan Z. ECOS 96, 1996, SWEDEN, PP. 141 - 145
- [7] 林国星, 严子浚. 太阳能学报, 1996, 17(4): 371
- [8] Andresen B et al. J. Chem. Phys. 1977, 66 1571

—— [市场简讯] ——

家用空调器质量下降

上海市质检所按上海市技术监督局规定, 对上海 7 家家用空调器生产企业和 3 家销售企业共抽查 53 台空调器产 (商) 品, 其中国产 (含中外合资) 有 4 台, 分属上海、广东、天津、浙江、江苏、湖北、山东、辽宁、安徽等九个省市, 进口空调器有 9 台, 分别为日本、美国、韩国、泰国、马来西亚等五国的产品, 包括有窗式、分体壁挂、立柜式、移动式、一体式。

在这次检验中, 合格产 (商) 品为 66%, 不合格 18 台占 34%, 其质量较 1996 1995 年均为下降, 总体合格率比 1996 年下降 15. 2%, 比 1995 年下降 3. 8%。

据上海市质检部门分析, 合格率大幅度下降的原因大致有:

(1) 部分企业只注重产量和销售量, 为争夺市场, 大幅降价造成大幅削减成本, 致使在生产过程中对零部件、原材料和装配工艺有所放松, 没有严格执行标准, 使不合格率大幅上升。

(2) 有的企业对整机总装调试和检验不严格, 再因空调产品几经运输, 一些零部件移位, 造成噪声过大和出现制冷剂泄漏等问题。

(3) 一些进口空调器未考虑我国的标准及质量法规, 因此在检验时未通过, 被判为不合格品。

—— (上海特约通讯员 王良)